

Estimation de position de bateaux depuis l'espace à l'aide des signaux AIS

Jean-Yves BAUDAIS¹, Stéphane MÉRIC¹ et Julia LE MAITRE²

¹IETR — 20, av. des Buttes-de-Coësmes, CS 14315, 35043 Rennes Cedex, France

²CNES — 18, avenue Édouard Belin, 31401 Toulouse Cedex 9

{jean-yves.baudais,stephane.meric}@insa-rennes.fr

Résumé — Les signaux AIS sont échangés par des bateaux en visibilité afin d'améliorer la sécurité en mer. Dans le contexte de la surveillance depuis l'espace, l'exploitation de ces signaux permet d'améliorer le contrôle des routes maritimes. Cette exploitation passe par la séparation des différents messages reçus dans le même espace temps-fréquence par le satellite. Dans cet article nous exploitons la partie commune des séquences AIS afin d'estimer la position des sources émettrices. L'estimateur proposé est basé sur la corrélation spatiale et ses performances sont quantifiées.

Abstract — The AIS signals are exchanged by boats in visibility to improve safety at sea. In the context of monitoring from the space, these signals allows to improve the control of the sea routes. This exploitation needs the separation of the various received messages in same time-frequency space by the satellite. In this article we exploit the common part of the AIS sequences to estimate the position of the transmitting sources. The proposed estimator is based on the space correlation and its performances are quantified.

1 Contexte

Le rôle croissant du spatial permet un contrôle discret des communications radios sur toutes les zones sensibles du globe. Dans le contexte maritime, les capacités spatiales de surveillance peuvent intervenir en complément des autres moyens au sol. Imposé par l'Organisation maritime internationale et par la Convention internationale pour la sûreté de la vie en mer, le système d'identification automatique (AIS, *automatic identification system*) peut être exploité par des constellations satellites pour améliorer la surveillance des routes maritimes. Ce système AIS est un système de communication radio-fréquence initialement utilisé par des bateaux et des stations côtières afin de communiquer l'identité, le statut, la position ou la route des unités AIS et ainsi anticiper les actions à mener pour éviter les collisions. Ce système est autonome, automatique et fonctionne principalement en mode d'émission. Les transmissions s'effectuent en bande VHF (*very high frequency*) et la portée est au plus de 20 à 30 miles nautiques (nm). Alors que ces distances de visibilité sont suffisantes pour accroître la sécurité de navigation des bateaux en mer, des applications à plus longue distance utilisant des satellites défilants [1] sont envisagées par les organismes civils et militaires de surveillance afin de détecter et de suivre les bateaux à plus de 200 nm des côtes ou des stations offshore.

Cet article est organisé de la façon suivante. Le para-

graphe 2 décrit de façon générale le problème lié aux interférences et la méthode utilisée pour le résoudre. Dans le paragraphe 3, nous décrivons les caractéristiques des signaux AIS et la géométrie de la liaison. Le paragraphe 4 décrit les fonctions de corrélation utilisées par l'estimateur de position. Le paragraphe 5 donne quelques éléments sur la robustesse de cet estimateur et le paragraphe 6 conclut.

2 Problème et méthode

Au niveau des mers, les signaux AIS de bateaux en visibilité accèdent au canal de communication par une répartition en temps, évitant ainsi les collisions entre messages. Au niveau du satellite, des signaux de bateaux qui ne se voient pas peuvent être reçus dans le même espace temps-fréquence, conduisant ainsi à des interférences. La surveillance des routes maritimes dans des environnements denses nécessite alors la séparation de ces signaux AIS superposés.

Les signaux AIS possèdent un préambule commun à tous les messages. La connaissance de ce préambule peut avantageusement être exploitée pour séparer les signaux et cette séparation s'effectue alors en deux étapes : 1) estimation des paramètres de la liaison à l'aide du préambule, 2) filtrage et démodulation des signaux reçus. Dans cet article, nous nous intéressons à la première étape de cette séparation à savoir l'estimation des paramètres de

la liaison qui se résume à l'estimation de la position des émetteurs AIS.

3 Caractérisation du problème

Signal AIS et géométrie Les caractéristiques techniques des signaux AIS sont décrites dans [2]. Ces signaux sont transmis sur une fréquence porteuse autour de 162 MHz à un débit de 9600 b/s, la modulation est une GMSK (*Gaussian modulation shift keying*) et les émetteurs sont synchronisés au temps UTC (*universal time coordinated*). Les messages sont envoyés sur un des 2250 slots temporels constituant une trame d'une minute et le mode d'accès au canal est le SO-TDMA (*self-organized time division multiple access*).

Nous considérons un satellite à 950 km d'altitude se déplaçant à 7,4 km/s [3] : le satellite parcourt 197 m pendant la durée d'un slot. L'antenne à bord du satellite est telle que la vision est latérale et son empreinte au sol a un rayon de 500 km, avec une zone éclairée comprise dans l'intervalle $[-500; 500]$ km selon l'axe d'évolution du satellite (axe *along*) et $[0; 1000]$ km selon l'axe perpendiculaire à l'axe précédent (axe *cross*), cf. figure 1.

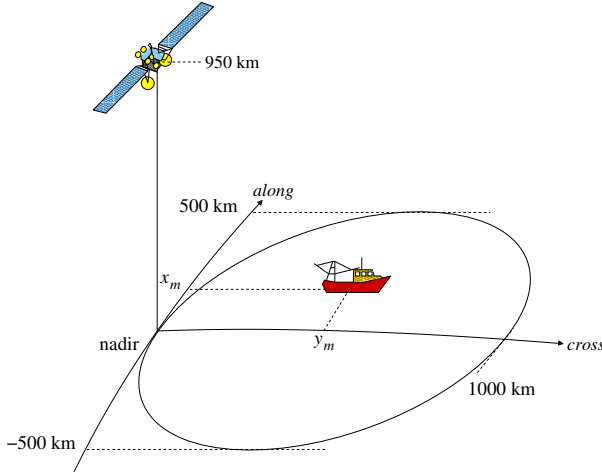


FIG. 1 – Géométrie de la liaison.

Signal reçu Dans notre problème, nous considérons le signal en bande de base, $s_i(t)$, reçu par le satellite comme la somme des signaux émis par M bateaux qui ne se voient pas et qui émettent sur le même slot temporel i . À cette somme s'ajoute un bruit $\xi_i(t)$ blanc gaussien circulaire de variance σ^2

$$s_i(t) = \sum_{m=1}^M s_{i,m}(t) + \xi_i(t) , \quad (1)$$

où le signal $s_{i,m}(t)$ dépend de la position du bateau m via le vecteur d'onde. Afin d'alléger les notations, m repré-

sente aussi bien l'indice du bateau que la position spatiale de celui-ci. Le signal $s_{i,m}(t)$ s'écrit

$$s_{i,m}(t) = A_{i,m} e^{j\phi_{i,m}} p_{i,m}(t - \tau_{i,m}(t)) e^{j\omega_{i,m}(t - \tau_{i,m}(t))} e^{-j\omega_0 t} , \quad (2)$$

avec $p_{i,m}(t)$ le signal GMSK en bande de base

$$p_{i,m}(t) = e^{j\frac{\pi}{2} \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \alpha_l \int_{-\infty}^{t-lT} g(\eta) d\eta} , \quad (3)$$

où $g(\cdot)$ est le filtre gaussien de la modulation GMSK, $\{\alpha_l\}$ les symboles NRZI (*non return to zero*) et T la période du signal. Ce signal GMSK est émis à la pulsation $\omega_{i,m}$ et reçu avec une amplitude complexe $A_{i,m} e^{j\phi_{i,m}}$ et un retard de propagation $\tau_{i,m}(t)$ dépendant de la distance entre le bateau et le satellite et des erreurs de synchronisation. Ce signal est transposé en bande de base au niveau du satellite à l'aide de la pulsation ω_0 . L'approximation bande étroite permet d'écrire

$$p_{i,m}(t - \tau_{i,m}(t)) \simeq p_{i,m}(t - \tau_{i,m}(0)) , \quad (4)$$

avec $\tau_{i,m}(0)$ le retard à l'origine du slot.

4 Corrélation spatiale

Dans cette partie nous nous intéressons à un système cohérent en temps et en fréquence. Cette cohérence se traduit par une synchronisation parfaite de l'émetteur en temps et en fréquence, c.-à-d. $\omega_{i,m} = \omega_0$ pour tout couple $\{i, m\}$, et les émetteurs possèdent la même référence temporelle que le satellite. Il n'y a pas d'erreur de synchronisation temporelle et $\tau_{i,m}(t)$ ne dépend que la distance entre le bateau et le satellite.

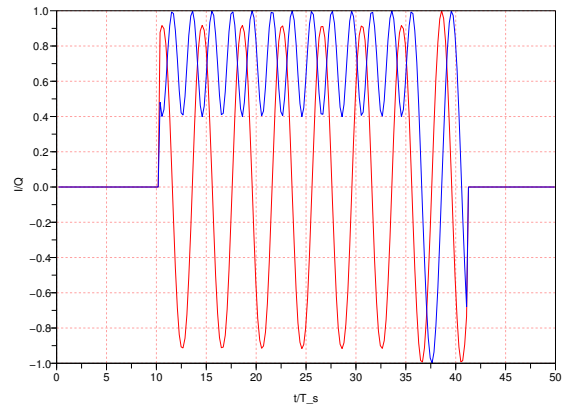


FIG. 2 – Représentation des 50 premiers temps symboles des voix en phase et en quadrature de la fonction de référence $s_{i,m_0}^0(t)$ pour un retard nul.

Fonction de corrélation L'estimation de la position des bateaux s'obtient à partir d'une fonction de corrélation spatiale normalisée et calculée sur le préambule de la séquence AIS. La fonction de corrélation est un produit scalaire normalisé

$$\Gamma_i(m_0) = \frac{\langle s_{i,m_0}^0(t), s_i(t) \rangle}{\|s_{i,m_0}^0(t)\|_2^2}, \quad (5)$$

où $s_{i,m_0}^0(t)$ est le préambule de 32 bits reçu par le satellite et émis par un bateau situé en m_0 . La figure 2 donne l'enveloppe complexe de la fonction de référence, le préambule de la séquence AIS pour un décalage $\tau_{i,m}(0) = 0$ et seul les cinquante premiers temps symboles sont représentés. Un exemple de signature spatiale, représentant l'amplitude en dB de la fonction de corrélation pour toutes les positions spatiales, est donné sur la figure 3 pour un bateau situé en $\{x_m, y_m\} = \{0, 500\}$ km. Un plancher est fixé à -10 dB pour l'affichage de la fonction. Le nadir du satellite au début du slot est l'origine du repère. Le satellite se déplaçant selon l'axe *along*, la corrélation selon cet axe présente des lobes secondaires plus faibles que ceux obtenus selon l'axe *cross*.

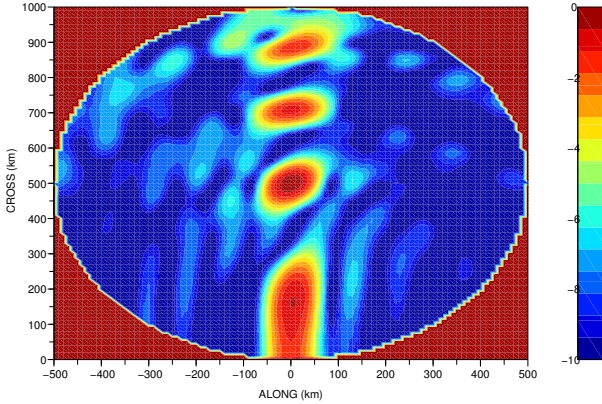


FIG. 3 – Signature spatiale, amplitude de la fonction de corrélation $\Gamma_i(m_0)$ en dB, d'un bateau en $\{x_m, y_m\} = \{0, 500\}$ km.

Dans le cas d'un seul bateau émetteur, le RSB (rapport signal sur bruit) de l'auto-corrélation est alors

$$\text{RSB}_{\Gamma_i(m_0)} = N \frac{A_{i,m_0}^2}{\sigma^2}, \quad (6)$$

où N est le nombre d'échantillons utilisés pour calculer la corrélation.

Traitement multi-slot Les messages AIS sont envoyés avec une période de répétition moyenne de 7 s [3]. Afin de réduire les inter-corrérelations, on effectue alors un traitement sur I slots. Nous supposons les signaux des bateaux

de même période de répétition et les slots connus. Les signaux étant reçus avec une phase à l'origine aléatoire et indépendante d'un slot à l'autre et d'un bateau à l'autre, la corrélation est alors une corrélation en amplitude afin de s'affranchir de ces phases. Cette fonction s'exprime par

$$\Gamma_I(m_0) = \frac{\sum_{i=1}^I |\langle s_{i,m_0}^0(t), s_i(t) \rangle|}{\|s_{i,m_0}^0(t)\|_2^2}. \quad (7)$$

Le RSB de l'auto-corrélation en amplitude sur plusieurs slots est [4, chapitre 2]

$$\text{RSB}_{\Gamma_I(m_0)} = \frac{f(I \cdot \text{RSB}_{\Gamma_i(m_0)})}{I \cdot \text{RSB}_{\Gamma_i(m_0)} + 1 - f(I \cdot \text{RSB}_{\Gamma_i(m_0)})}, \quad (8)$$

avec $f(x) = \frac{\pi}{4} e^{-x} \left((1+x) I_0\left(\frac{x}{2}\right) + x I_1\left(\frac{x}{2}\right) \right)^2$, où I_0 et I_1 sont les fonctions de Bessel modifiées de seconde espèce. Pour $x \gg 1$, $f(x) \simeq x + \frac{1}{2}$. Ainsi l'équation (8) devient $\text{RSB}_{\Gamma_I(m_0)} \simeq 2I \text{RSB}_{\Gamma_i(m_0)}$.

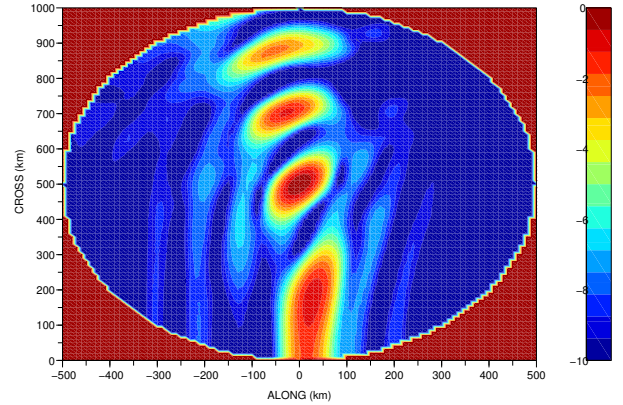


FIG. 4 – Signature spatiale, amplitude de la fonction de corrélation $\Gamma_I(m_0)$ en dB calculée sur 10 slots, d'un bateau en $\{x_m, y_m\} = \{0, 500\}$ km.

Comme le montre la figure 4, le traitement sur plusieurs slots ne permet pas de réduire la taille du lobe principal à -3 dB car les contributions des corrélations sur chaque slot sont combinées en amplitude et non en amplitude et phase.

Cas de M bateaux Nous nous intéressons ici au pouvoir séparateur de l'estimateur. Comme le montre les figures 3 et 4, la largeur du lobe principal à -3 dB est d'environ 100 km pour un bateau en $x_m = 0$ km; elle est supérieure à la distance de visibilité qui est au plus de 30 nm, soit environ 55 km. La séparation des bateaux n'est alors pas possible pour une forte densité d'occupation des mers.

La figure 5 donne un exemple de signature spatiale, calculée sur 10 slots, de deux bateaux situés en $\{0, 500\}$ km

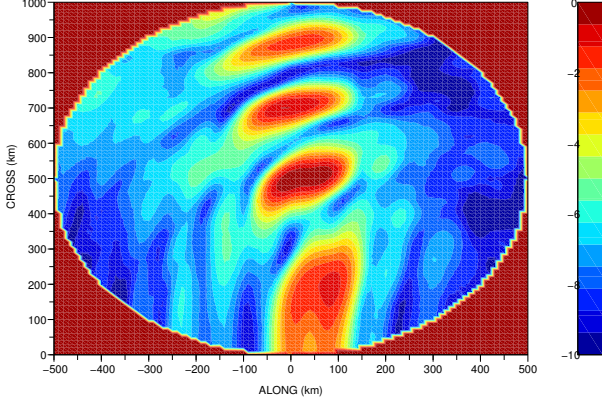


FIG. 5 – Signature spatiale, calculée sur 10 slots, de deux bateaux en $\{x_m, y_m\} \in \{\{0, 500\}, \{60, 500\}\}$ km.

et $\{60, 500\}$ km. L'estimation des sources est possible mais l'algorithme de détection reste à préciser ainsi que les caractéristiques opérationnelles du récepteur.

5 Robustesse de l'estimateur

La position estimée \hat{m} est donnée par le maximum de la fonction de corrélation $\hat{m} = \arg \max \Gamma_I(m_0)$. Cette position estimée est alors la valeur qui maximise la vraisemblance entre le signal reçu $s_i(t)$ et le signal $s_{i,\hat{m}}^0(t)$. La figure 6 donne l'écart type de l'estimateur non biaisé pour un bateau situé en $\{0; 500\}$ km avec une corrélation sur un slot. On observe une décroissance classique en $1/\sqrt{\text{RSB}}$ de l'écart type de la mesure obtenue par filtrage adaptée.

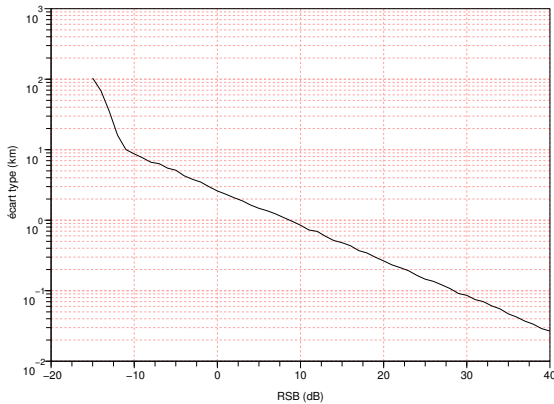


FIG. 6 – Écart type de l'estimateur $\arg \max \Gamma_I(m_0)$ pour un bateau situé en $\{0; 500\}$ km sur 1 slot en fonction du RSB.

La corrélation sur I slots correspond à une estimation de la position avec une séquence d'estimation I fois plus

longue. Comme le montre la figure 7 la décroissance de l'écart type de l'estimateur en fonction du nombre de slots I est bien en $1/\sqrt{I}$. On peut alors atteindre un écart type de l'estimation inférieur à 1 km pour un RSB de 0 dB.

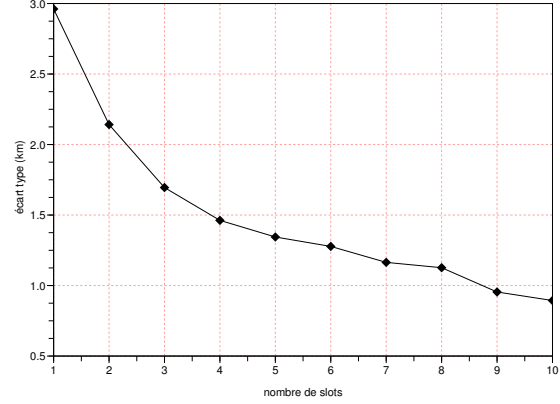


FIG. 7 – Écart type de l'estimateur $\arg \max \Gamma_I(m_0)$ pour un bateau situé en $\{0; 500\}$ km en fonction du nombre de slots, pour un RSB de 0 dB.

6 Conclusion

Dans le contexte de la surveillance maritime par satellite en orbite basse, il est proposé d'exploiter les signaux de télécommunications AIS émis par des bateaux. Nous montrons que l'estimation de la position de ces bateaux est possible à partir d'un estimateur simple basé sur la corrélation. Nous montrons également l'intérêt d'un traitement multi-slot.

Remerciements

Cette étude a fait l'objet d'un soutien financier du CNES sous les conventions 71110/00 et 81658/00.

Références

- [1] B.J. TETREAU, « Use of the Automatic Identification System (AIS) for Maritime Domain Awareness (MDA) ». In *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS*, vol. 2, pages 1590–1594, septembre 2005.
- [2] ITU-R M.1371-2, *Technical characteristics for a universal shipborne automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile band*. ITU Radiocommunication recommendation, 2006.
- [3] ITU-R M.2084, *Satellite detection of automatic identification system messages*. ITU Radiocommunication report, septembre 2006.
- [4] J.G. PROAKIS, *Digital communications*. Electrical engineering, McGraw-Hill, 3rd ed., 1995.